

Uso de células tipo STT-Furnas na determinação de tensões *in situ* na Mina Cuiabá – Sabará/MG

Diogo Braga Brandani

AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, DBBrandani@anglogoldashanti.com.br

João Luiz Armelin

Furnas Centrais Elétricas S/A., Aparecida de Goiânia, Brasil, armelin@furnas.com.br

Rodrigo Peluci de Figueiredo

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, rpfigueiredo@demin.ufop.br

RESUMO: A magnitude e direção das tensões *in situ* é um dos parâmetros de entrada mais relevantes na análise das escavações de lavra e desenvolvimento em empreendimentos mineiros. Pequenas variações nessas tensões podem acarretar grandes mudanças no *design* da mina e, conseqüentemente, no resultado financeiro dos projetos. O entendimento do comportamento do campo de tensões com o aprofundamento da mina é essencial para uma otimização do *layout* das escavações. A determinação das tensões *in situ* em empreendimentos civis e mineiros vêm sendo difundida desde os anos 70. A partir das primeiras células triaxiais desenvolvidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa (LNEC), Furnas promoveu aperfeiçoamentos e desenvolveu um novo dispositivo para medição de tensões por *overcoring*, com mais baixa rigidez e no qual apenas as rosetas de extensômetros são efetivamente coladas à parede do furo. Alterou também o arranjo das rosetas de *strain gages* para permitir um melhor aproveitamento das informações coletadas em cada ponto ensaiado. Pretende-se neste artigo abordar principalmente os aspectos técnicos e operacionais envolvendo a execução dos ensaios para determinação das tensões *in situ* nos níveis 11, 13 e 17 da mina subterrânea de Cuiabá (da AngloGold Ashanti, ou simplesmente AGA), localizada no município de Sabará/MG. Espera-se que com a interpretação dos resultados, além de se determinar a magnitude e a direção das tensões principais, seja possível estabelecer a variação das mesmas com a profundidade. Para tanto, foi utilizado o último modelo das células triaxiais tipo *Stress Tensor Tube* (STT) fabricadas por Furnas. O ensaio de *overcoring* consiste em um método de alívio total das tensões, no qual três passos básicos devem ser realizados na execução, a destacar: a perfuração de um furo com diâmetro HW até a profundidade de ensaio, execução de um furo concêntrico com diâmetro EW e sua posterior sobrefuração já instrumentado, ou seja, com a célula devidamente aderida às suas paredes. Enfatizam-se neste trabalho aspectos executivos como a importância da escolha do local e da profundidade para execução dos ensaios, a fim de garantir que o ponto de interesse esteja situado fora da zona de influência das escavações vizinhas. Da mesma forma, será dado o devido enfoque a algumas questões práticas que envolvem o ensaio, como a presença de água e de uma condição geomecânica do maciço rochoso que seja adequada à sua execução. Por fim, serão também apresentados alguns resultados preliminares obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: *Overcoring*, Tensão *in situ*, *Stress Tensor Tube* (STT-Furnas), células triaxiais.

1 INTRODUÇÃO

Na Mina Cuiabá lavra-se um depósito de ouro desde meados da década de 80, onde atualmente são desenvolvidas galerias a mais de 1200 m de profundidade. Neste ambiente, as tensões pré-existentes (*in situ*) já se mostram elevadas o suficiente para plastificar o maciço rochoso ao redor das escavações, permitindo observar fenômenos de instabilidade tais como, rupturas por compressão com a formação de lascas/fatias em rocha dura (*spalling*), por flambagem (*buckling*) em rochas xistosas e *breakouts* em escavações circulares como os *raises* de ventilação. Além disso, os testemunhos de sondagem na Mina Cuiabá têm registrado diversos intervalos com a ocorrência de *discings* em formação ferrífera bandada (BIF) desde 2008 (Trópia, 2013).

Em 2004 foi realizada a primeira campanha para determinação das tensões *in situ* nos níveis 12 e 14 da mina Cuiabá. Na ocasião foram realizados ensaios de sobrefuração utilizando células triaxiais tipo CSIR (Leeman, 1971) tanto em xistos (rocha encaixante) quanto na BIF (minério). Os resultados obtidos em cada um dos locais foram discordantes entre si, tanto em relação à direção quanto à magnitude das tensões principais. Entretanto, ao menos as direções das tensões encontradas na BIF foram coerentes com as atitudes daquela formação geológica. Maiores informações referentes a tais resultados podem ser obtidas em Trópia & Figueiredo (2015), os quais serão futuramente revisitados com a finalidade de compará-los com os resultados apresentados neste artigo.

A utilização de células triaxiais tipo *STT* vêm sendo difundida desde a década de 70, a partir de pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa (LNEC) - por exemplo, Rocha et al. (1975). Entretanto, tais células eram relativamente rígidas, com extensômetros separados, dispostos com seus centros alinhados segundo geratrizes dadas, sem verdadeiramente formarem rosetas, o que, consequentemente, afetava a exatidão dos cálculos para a determinação do campo de tensões.

Armelin (2010) apresentou melhorias técnicas e operacionais envolvendo o uso das células

triaxiais *STT* (LNEC) apresentadas por Pinto (1990). Em resumo, a célula *STT* desenvolvida por Furnas apresenta um tubo de menor rigidez, o que garante maior flexibilidade de deformação aos extensômetros, ou seja, a rigidez da célula produzida praticamente não interfere nos resultados das deformações registradas, uma vez que os strain gages são posicionados e colados sobre um filme plástico, sendo o anel de resina, responsável pela única interferência local. Tal anel solidariza a célula ao maciço a partir de uma camada aplicada em espessura de cerca de 1,5 mm., com módulo de elasticidade na ordem de 3 GPa. Além disso, alterações promovidas no posicionamento das rosetas e *strain gages* permitiram obter, além da desejável redundância nos dados, um melhor aproveitamento da informação coletada em cada local ensaiado.

Ensaio localizados de pequena escala como os de *overcoring* indicam apenas condições pontuais do campo de tensões *in situ*. A extrapolação de tais informações para as demais áreas de uma mina subterrânea nem sempre é possível, tendo em vista que o campo de tensões *in situ* é controlado por múltiplos fatores (ex: heterogeneidades geológicas, anisotropias mecânicas, etc.). É necessária uma completa compreensão das tensões em escala regional na busca de um padrão a ser adotado para a mina, que permita fazer estimativas mais fidedignas da distribuição das tensões *in situ* em diferentes locais e profundidades.

Sem uma apropriada estimativa do campo de tensões *in situ* não é possível se chegar à adequada compreensão das tensões induzidas pelas atividades de mineração. Tal informação é de suma importância para a calibração de modelos numéricos elaborados com o intuito de avaliar as tensões induzidas pelas atividades de lavra e desenvolvimento e, consequentemente, permitir uma otimização do *layout* da mina.

Os objetivos deste artigo são principalmente descrever a execução e a metodologia empregadas na campanha de sondagem e ensaios (*overcoring*) utilizados na determinação das tensões *in situ* na Mina Cuiabá. Apresentam-se também alguns exemplos preliminares das análises e da interpretação dos resultados obtidos.

2 SONDAGENS E ENSAIOS EM CAMPO

2.1 Metodologia

Diferentes métodos para a determinação do campo de tensões foram aventados para a presente campanha. Entretanto, experiências obtidas na campanha anterior mostraram que a utilização do método de *overcoring* nos xistos gerou problemas envolvendo a análise dos resultados e obtenção dos parâmetros elásticos, devido à anisotropia (xistosidade) da rocha. Da mesma maneira, a adoção do método de fraturamento hidráulico foi descartada diante dos riscos envolvendo a possibilidade da não obtenção de um trecho não fraturado com o comprimento mínimo necessário para cada ensaio (≥ 0.5 m), o que acarretaria a perda do furo, caso a espessura do minério não fosse o suficiente para permitir seu aprofundamento.

O *overcoring* consiste em um método de alívio total das tensões, no qual três passos básicos devem ser adotados para execução do ensaio, a destacar (Figura 1): a perfuração do furo com diâmetro HW até a profundidade de ensaio, execução de um furo concêntrico com diâmetro EW e sua sobrefuração já instrumentado, ou seja, com a célula devidamente aderida às suas paredes.

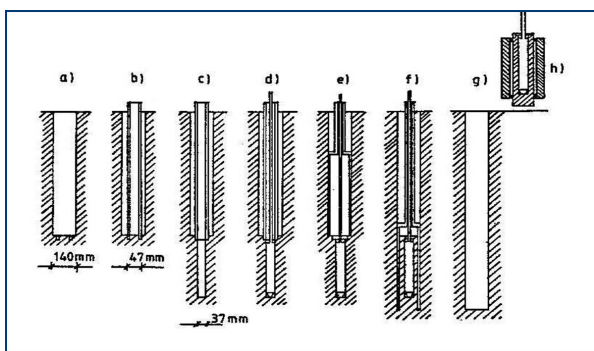


Figura 1. Passos para execução dos ensaios de sobrefuração (*overcoring*) - adaptado de Pinto (1990).

2.2 Locais para realização dos ensaios

A primeira etapa, após a escolha da metodologia apropriada para a campanha, consiste em selecionar os locais em subsolo que permitam a execução dos ensaios, tendo em vista eventuais limitações técnicas e operacionais para sua aplicação. A partir desta

etapa foi essencial, para um bom planejamento e levantamento de riscos, a participação ativa tanto da AGA, quanto da empresa responsável pela execução dos furos e da equipe de Furnas, responsável pela execução dos ensaios. Para execução da sondagem foi escolhida a empresa GEOSOL, levando-se em conta a sua experiência anterior, adquirida com a participação na campanha ocorrida em 2004.

Em termos operacionais, os dois principais aspectos limitadores da utilização da célula de Furnas são, primeiramente, a necessidade de furos verticais e descendentes, que permitam o acúmulo da resina usada na colagem da célula, no fundo do furo. O segundo fator consiste na limitação do ponto de ensaio mais profundo situar-se no máximo a 30 m da boca do furo, devido à extensão das ferramentas disponibilizadas por Furnas para realizar as medidas.

Sob o ponto de vista técnico, foi definido pela AGA que todos os ensaios ocorreriam na BIF, já levando em consideração os problemas envolvendo a realização de ensaios nos xistos (encaixantes) durante a campanha de 2004, devido à anisotropia. Outro desafio para a equipe técnica foi encontrar posições para uma sondagem vertical e descendente, com o comprimento mínimo de 15 m ($= 3 \times$ diâmetro da escavação) e ao mesmo tempo fora da zona de influência das tensões induzidas pelos realces da lavra vizinhos, tendo em vista que no *layout* da Mina Cuiaba são restritas as posições onde o desenvolvimento atravessa a estrutura mineralizada no sentido do *hangingwall*, permitindo, assim, executar uma perfuração descendente. Tal aspecto limitou sobremaneira as opções de locais para os ensaios, restando algumas poucas escavações destinadas à ventilação da mina e a sondagens de pesquisa feitas a partir do *hangingwall*.

Todavia, era ainda necessário garantir que o furo interceptasse a mineralização, em seu contato superior (*hangingwall*), entre as profundidades de 15 e 30 m (limite mínimo para a ficar fora da influência das tensões induzidas pela própria escavação e máximo pelo ferramental disponível) e, por fim, apresentando uma espessura mínima não fraturada ($\approx 1,5$ m) que garantisse a realização

de 2 ensaios por furo, o primeiro validando o segundo, conforme recomendação de Furnas. Para tal tarefa, foi essencial uma análise e interpretação de toda as informações disponíveis, tais como, furos de sondagem e modelo geológico, além de um mapeamento em campo, sendo este último o mais importante para confirmação da presença e espessura do minério no ponto pré-selecionado.

Após uma criteriosa seleção, visita em campo com toda a equipe do projeto e validação junto à toda equipe técnica, foi possível determinar 3 locais para a realização dos ensaios, quais sejam: N11 Pêra, N13 FGS DRV e N17 SER, nas profundidades de 759, 811 e 1124 m, respectivamente.

A Figura 2 apresenta esquematicamente, os critérios de seleção utilizados.

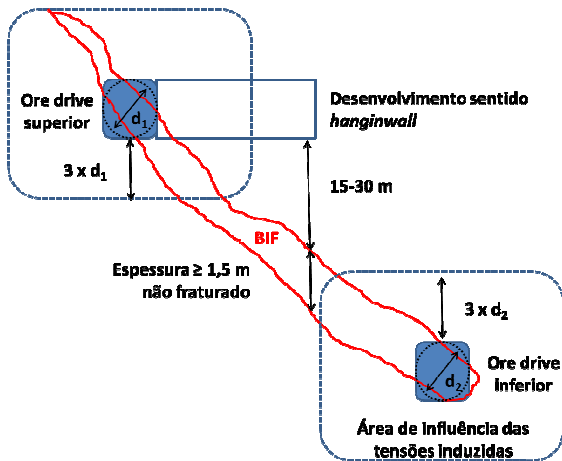


Figura 2. Ilustração esquemática dos critérios para localização dos furos para os ensaios de determinação de tensões usando as células STT-Furnas.

2.3 A sondagem com sobrefuração

Para a campanha de sondagem a GEOSOL utilizou uma sonda rotativa com motor elétrico Atlas Copco, modelo Diamec-252, equipada com moto-bomba Sondeq modelo SB-75, com motor elétrico e comando no painel da sonda.

A sondagem consistiu, primeiramente, na execução de um furo com diâmetro HW até a profundidade de ensaio. Uma vez atingida tal profundidade é executado um nivelamento do fundo do furo com uma coroa cega, de maneira a garantir o emboque centralizado do furo de diâmetro EW. Em seguida, o furo EW é aprofundado pelo menos por mais 30 cm, de

maneira que comporte toda a extensão do tubo cilíndrico da célula em seu interior. Nesta ocasião, é aconselhável que o furo seja filmado ou seu testemunho avaliado para verificar a possível existência de fraturas pré-existentes ou *discings*, que prejudicariam o andamento do teste. Caso não identificadas tais feições é possível dar sequência aos preparativos para a instalação da célula.

A qualidade na execução da atividade de sondagem, principalmente durante manobras e na sobrefuração, são fatores determinantes na aplicação do método *overcoring*. Problemas na sobrefuração podem acarretar testemunhos não centralizados (Figura 3a).

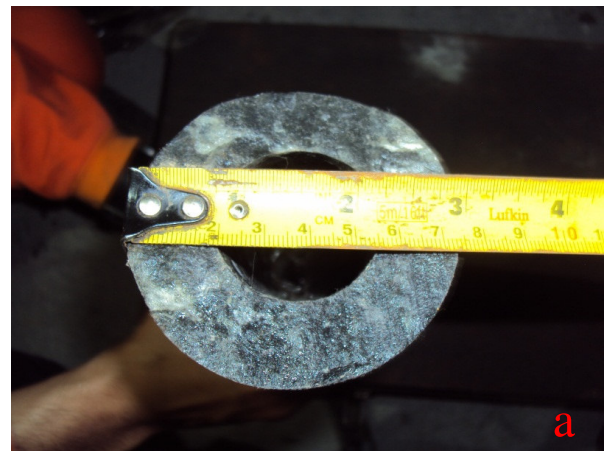


Figura 3. Foto ilustrando ensaios dispensados por problemas envolvendo não centralização do furo (a) e quebra do testemunho após sobrefuração (b).

Alguns cuidados durante a operação de sondagem são indispensáveis para se garantir a integridade dos testemunhos, verticalidade e centralização do furo. Abaixo são listados alguns aspectos levantados durante a campanha

executada na mina Cuiabá:

- controle topográfico na locação precisa do furo em campo, bem como, na marcação de referência (p. ex., o Norte magnético) para o posicionamento da célula durante a colagem;
- adequada ancoragem da sonda, evitando desnivelamentos ou folgas;
- controle na rotação e pressão de avanço;
- uso de centralizadores adequadamente espaçados entre hastes;
- checagem da inclinação do furo;
- evitar trancos durante as manobras ou troca/quebra de hastes;
- remoção cuidadosa dos testemunhos, principalmente o HW que é sobrefurado em EW, evitando impactos que levem à sua quebra ou mesmo a impactos bruscos na célula.

Dentre todos os fatores acima listados vale destacar a importância do uso de ferramentas que garantam a perfeita centralização entre os furos EW e HW, tais como centralizadores e conjunto de hastes rígidas o suficiente para tal finalidade.

2.4 O ensaio de sobrefuração

Os preparativos para execução do ensaio foram iniciados antes de concluída a perfuração do furo EW central e envolvem, principalmente, a proteção e impermeabilização do módulo de aquisição de dados (MAD) que ficará acoplado à célula para o registro das leituras durante o ensaio (Figura 4a).

O MAD consiste de um dispositivo eletrônico que possibilita a aquisição de dados durante um período de 45 min, com intervalos de aquisição de 15 s. No seu interior, um dispositivo tipo *clock* permite a sua ativação até 48 h após ser posicionado no interior do furo, período esse usualmente necessário à completa polimerização da resina de colagem. Esse modelo também dispõe de uma bússola interna digital para a indicação da orientação em relação ao campo magnético da terra (Armelin, 2010).

Uma vez introduzida a célula no furo, deve-se garantir que uma das suas rosetas de *strain gages* esteja direcionada para uma referência geográfica conhecida, no caso presente, o Norte

magnético. Tal direcionamento é realizado a partir de ranhuras presentes no tubo de aço galvanizado utilizado para a introdução tanto da célula quanto da resina epoxi utilizada na sua colagem. A Figura 4b ilustra como a célula fica posicionada no furo de diâmetro EW e uma das suas quatro rosetas de três *strain gages*.

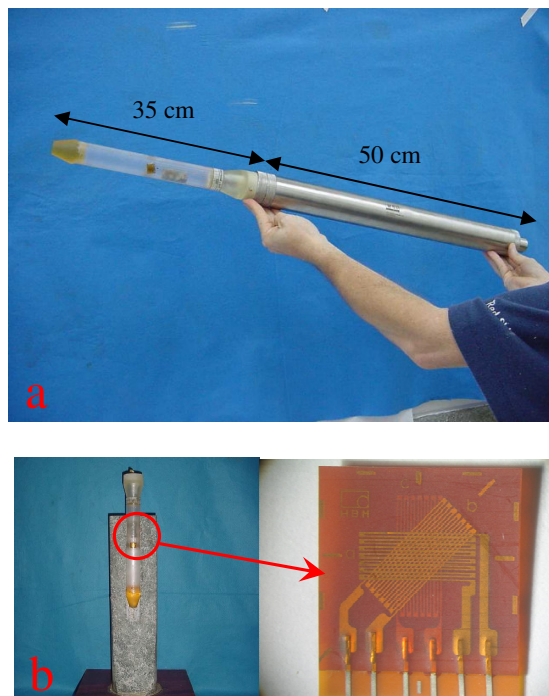


Figura 4. Módulo de aquisição de dados acoplado à célula triaxial (a) e ilustração da célula posicionada dentro do furo em diâmetro EW e de uma das suas quatro rosetas de três *strain gages* (b).

O principal desafio durante a etapa de ensaio está na limpeza e remoção da água presente no furo, garantindo uma perfeita colagem da célula pela resina. Uma boa drenagem, impedindo o acúmulo de água na praça de sondagem, combinada à cimentação/recorte do furo e introdução de ar comprimido pressurizado podem ser necessárias para garantir tais condições.

Após o lançamento da resina no furo EW, realizado com uso de uma mangueira, deve-se descer cuidadosamente a célula até à posição de ensaio, por meio dos tubos de aço galvanizado. Devido à fragilidade da célula, é de extrema importância que esta etapa seja feita com o devido cuidado, para que o peso do ferramental não a danifique (esmague) quando chegar ao fundo do furo.

A aquisição dos dados já é possível imediatamente após a cura da resina, uma vez que o MAD tenha sido programado para “acordar” e iniciar o registro das deformações. Durante a sobrefuração há o alívio de tensões no furo, que é evidenciado pelas deformações registradas pelos *strain gages*.

Ainda em campo é possível verificar o registro dos dados e atestar as condições do testemunho sobrefurado, validando ou não cada ensaio (Fig. 5). Por fim, são coletadas amostras para a realização de ensaios laboratoriais e levantamento dos parâmetros elásticos da rocha, por exemplo, a partir de células biaxiais. Tais parâmetros são dados de entrada para os cálculos necessários à determinação da magnitude e direção das tensões principais.

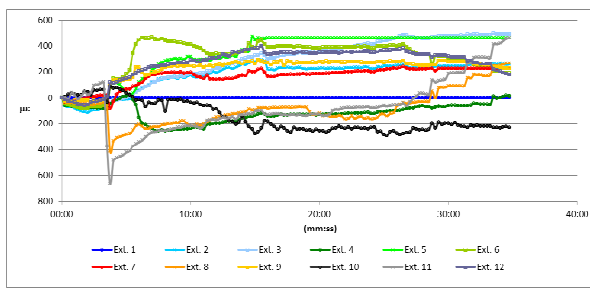


Figura 5. Acima, um exemplo de registro dos dados (ensaio no N11) e, abaixo, um testemunho empastilhado durante a execução da sobrefuração (ensaio no N17).

3 RESULTADOS

São apresentados, na sequência, alguns resultados parciais preliminares da campanha de medição das tensões *in situ*, que vem sendo aqui descrita. A interpretação e os cálculos

ainda se encontram em andamento e serão extensamente discutidos num trabalho futuro, específico para essa questão. Por ora, apenas os resultados relativos ao ensaio no N11 serão mostrados.

Em face de algumas dúvidas que pairam sobre os verdadeiros valores dos parâmetros elásticos da rocha sobrefurada (BIF), foram adotados 2 modelos de cálculo, a saber:

(1) o modelo de cálculo padrão, sugerido pela ISRM (1987), no qual os parâmetros elásticos (Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson) da rocha sobrefurada são dados de entrada e a redundância das medidas é resolvida via mínimos quadrados;

(2) um modelo alternativo, baseado em técnicas de programação matemática não-linear (Bazaraa *et al.*, 1993), no qual os únicos dados de entrada são as medidas de deformação, sendo os parâmetros elásticos “extraídos” como resultados do próprio ensaio, tal como sucede com as tensões *in situ*. Trata-se do que usualmente é conhecido por “Problema Inverso” (Tarantola & Valette, 1982a,b). Aqui as diferenças quadráticas entre as deformações medidas e aquelas que se calculam por meio das tensões *in situ* e dos parâmetros elásticos são minimizadas, impondo-se, adicionalmente, algumas poucas restrições, fisicamente razoáveis, aos valores que possam assumir uns e outros.

Independente do modelo de cálculo adotado, as medidas tomadas no N11 foram interpretadas mediante cuidadosa análise prévia dos dados brutos, na qual foram expurgados dos cálculos interpretativos aqueles extensômetros cujos registros se consideraram aberrantes e/ou anômalos durante a operação de sobrefuração.

Os cálculos foram empreendidos por meio de formulários de cálculo desenvolvidos com o *software* MathCad v15, que possuem facilidades para expurgar as medidas anômalas e/ou aberrantes, conforme se queira (Figura 6).

Os resultados obtidos para as tensões e direções principais pelos modelos de cálculos (1) e (2) estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2. Vale ressaltar que os parâmetros elásticos que figuram na Tabela 1 foram obtidos com ensaios de propagação de ondas em corpos de prova extraídos do local do

ensaio. Os ensaios triaxiais que foram realizados com o objetivo de determiná-los apresentaram resultados aparentemente inverossímeis e, por essa razão, foram descartados. Já na Tabela 2, os valores de E (módulo elástico) e ν (coeficiente de Poisson) foram determinados por meio da solução do Problema Inverso mencionado no modelo (2). Nesse caso, a técnica iterativa de programação não-linear recebeu como dados iniciais os mesmos valores dos parâmetros elásticos considerados para o modelo (1) e um estado de tensões nulo. A minimização das diferenças entre os valores medidos e calculados levou aos parâmetros elásticos e às tensões *in situ* apresentados na Tabela 2. Como se pode ali observar, há algumas diferenças em relação aos resultados do modelo (1). A diferença principal se dá na magnitude de σ_1 e nos parâmetros elásticos. As demais componentes principais e as direções de todas elas, de maneira geral, são próximas para os dois modelos de cálculo. Vale esclarecer, que se restringiram os parâmetros elásticos às seguintes faixas de variação: $10 \leq E$ (GPa) ≤ 100 e $0 \leq \nu < 0.5$. Cumpre ainda mencionar, que as componentes de tensão vertical calculadas com cada um dos dois modelos (para uma profundidade de 759 m) foram: com o modelo (1), $\sigma_v = 28.0$ MPa (correspondendo a um peso específico médio da cobertura de 0.037 MN/m^3) e, com o (2), $\sigma_v = 24.9$ MPa (correspondendo a um peso específico médio da cobertura de 0.033 MN/m^3). Em ambos os casos, considera-se que há uma razoável correspondência com o valor esperado para σ_v (= peso específico médio x profundidade).

Por sua vez, a Figura 7 mostra estereogramas com os resultados das direções das tensões principais. Vale notar, que a direção de σ_1 (um *trend* entre 120° e 130°) corresponde bastante bem ao que se observa na mina, onde frequentes problemas de instabilidade ocorrem quando as escavações se desenvolvem perpendicularmente a tal direção (Trópia, 2013). Mais além, a direção de σ_1 é também muito próxima daquela encontrada na campanha de 2004. Trópia & Figueiredo (2015) salientaram o fato de que essa direção é subortogonal à direção da BIF, a qual representa uma heteogeneidade de elevada

rigidez em relação às rochas encaixantes. Entretanto, na campanha de 2004, o *plunge* de σ_1 não se apresentava ortogonal ao mergulho da mesma, como também seria esperado (ver, p. ex., Hudson & Cooling, 1988), ou seja, obteve-se uma ortogonalidade apenas "parcial". Já nos resultados aqui apresentados, embora ainda preliminares, parece haver uma ortogonalidade vetorial "verdadeira" entre σ_1 e a BIF, isto é, tanto em termos do *trend* quanto do *plunge*.

Tabela 1 - Tensões e direções principais *in situ* no N11, pelo modelo de cálculo (1).

Tensão	$E = 77280 \text{ MPa} - \nu = 0.16$		
	Magnitude	<i>Trend</i> (°)	<i>Plunge</i> (°)
σ_1 (MPa)	37.1	127	38
σ_2 (MPa)	22.9	321	51
σ_3 (MPa)	6.6	223	7

Tabela 2 - Tensões e direções principais *in situ* no N11, pelo modelo de cálculo (2).

Tensão	$E = 51250 \text{ MPa} - \nu = 0.335$		
	Magnitude	<i>Trend</i> (°)	<i>Plunge</i> (°)
σ_1 (MPa)	28.7	127	47
σ_2 (MPa)	20.7	316	43
σ_3 (MPa)	6.3	222	5

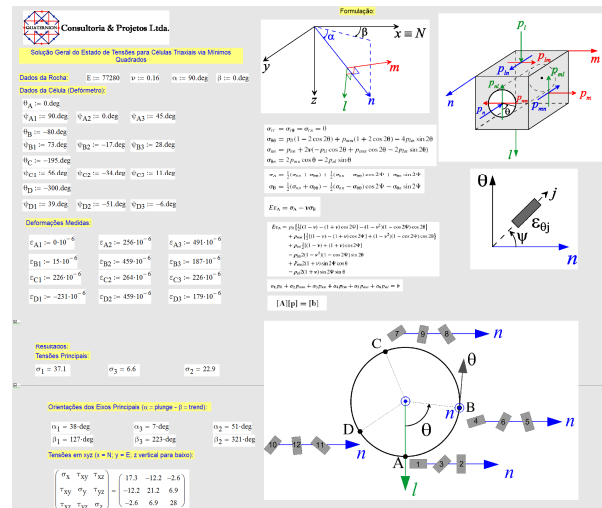


Figura 6. Formulário de cálculo em MathCad para cálculo das tensões em ensaios de *overcoring* com células triaxiais: resultados do modelo (1) para o N11.

Um outro aspecto dos resultados digno de menção é a sua consistência com a frequente ocorrência de empastilhamento em testemunhos de sondagem na BIF (Trópia, 2013). É sabido que tal fenômeno está associado a ambientes com elevadas tensões desviadoras (Xiao-Ping & Fang-Quan, 1994; Haimson & Lee, 1995), ou

seja, com grandes diferenças entre σ_1 e σ_3 . Os formatos notados nos discos (de "pratos" e/ou "selas" - Haimson & Lee, 1995) sugerem, por outro lado, que o mecanismo de ruptura seja principalmente por tração (Matsuki et al., 2004). Como mostraram Xiao-Ping & Fang-Quan (1994), nessas circunstâncias, a ocorrência de empastilhamento é mais comum quando a elevada tensão desviadora se associada a baixos valores de σ_3 e o diedro dessa última com σ_1 está inclinado em relação ao eixo do furo. Esse é justamente o caso que se verifica nos resultados obtidos no N11.

4 CONCLUSÕES

Foram apresentados os aspectos operacionais mais relevantes para o sucesso na execução de uma campanha de medição de tensões *in situ*, a grandes profundidades, com células triaxiais do tipo STT-Furnas, na Mina Cuiabá. Foram também apresentados alguns resultados preliminares, que além de muito verossímeis sugerem uma concordância bastante boa com fatos comumente observados na mina.

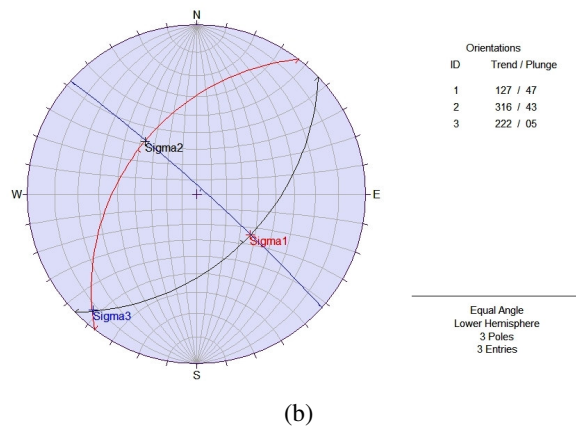
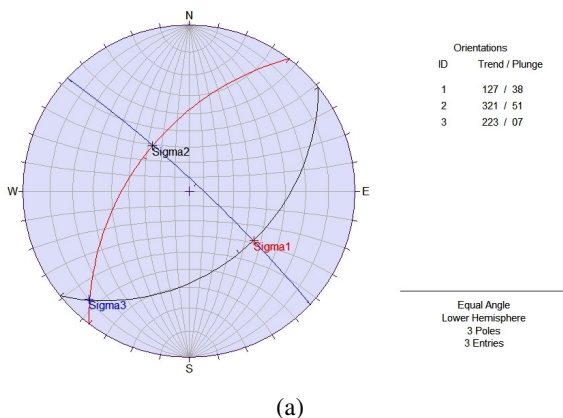


Figura 7. Estereogramas das direções principais obtidas no N11: (a) pelo modelo de cálculo (1); (b) pelo modelo (2). Obs.: estão plotados os pontos correspondentes às direções das tensões principais e seus respectivos planos ortogonais de atuação (σ_1 em vermelho, σ_2 em preto e σ_3 em azul).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às equipes da GEOSOL e FURNAS pelo apoio dedicado e discussões essenciais no planejamento do trabalho. Agradecimentos especiais ao empenho de toda a equipe técnica da AGA, fundamental para o sucesso da campanha, particularmente, à gerência de Mecânica das Rochas.

REFERÊNCIAS

- Armelin, J.L. (2010). *Medição de Tensões In Situ em Maciços Rochosos e Estruturas de Concreto*, Tese de Doutorado, Depto. de Eng. Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 305 p.;
- Bazaraa, M.; H. Sherali & C. Shetty (2006). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. 3rd ed., New York: Wiley, 872 p.;
- Haimson, B. & M. Lee (1995). *Estimating deep in situ stresses from borehole breakouts and core diskings - experimental results in granite*. In: Proc. 8th ISRM Congr., Tokyo, pp. 19-24;
- Hudson, J. A. & C. M. Cooling (1988). *In situ rock stress and their measurement in the UK - Part 1: The current state of knowledge*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 25, n. 6, pp. 363-370;
- ISRM (1987). *Suggested methods for rock stress determination*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 24, n. 1, pp 53-73;
- Pinto, J. L. (1990). *Novo tipo de aparelhagem para a execução de ensaios com o deformetro tridimensional*

- (STT) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Relatório 108/90 - NFR – Lisboa: 1-13.
- Leeman, E. R. (1971). *The CSIR doorstopper and triaxial rock stress measuring instruments*. Rock Mech., v. 3, pp 35-50;
- Matsuki, K; N. Kaga; T. Yokoyama & T. Tsuda (2004). *Determination of three dimensional in situ principal stress from core discing based on analysis of principal tensile stress*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v. 41, pp. 1167-1190;
- Rocha, M.; A. Silvério; J. Oliveira Pedro e J. Sintra Delgado (1975). *Nova forma do defórmetro desenvolvido pelo LNEC para a determinação do estado de tensão em maciços rochosos*. Geotecnia, n. 12, pp. 35-43;
- Tarantola, A. & B. Valette (1982)a. *Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion*. Rev. of Geophys. and Space Phys., v. 20, n. 2, pp 219–232;
- Tarantola, A. & B. Valette (1982)b. *Inverse Problems; Quest for Information*. Journal of Geophysics, v. 50, p. 159-170;
- Trópia, I.R. (2013) *Análise das tensões in situ em ambiente de lavra subterrânea – Mina Cuiabá – Sabará/MG*, Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, 217 p.
- Trópia, I. R. & R. P. Figueiredo (2015). *Análise das tensões in situ na Mina Cuiabá - Sabará - Minas Gerais - Brasil*. Geotecnia, n. 133, pp. 63-72;
- Xiao-Ping, R & L. Fang-Quan (1994). *The analysis of disk core from Maoping 800 m bore hole*. Acta Seismologica Sinica, v. 7, n. 2, pp. 245-250.